

上腕三頭筋腱の力学的特性の規定因子とそのトレーニング効果

Factors affecting mechanical properties of triceps brachii tendon and their trainability

村田 浩一郎 (Koichiro Murata) 指導：川上 泰雄

研究背景と目的

腱は筋と骨を結合させる非収縮組織である。腱は弾性を有し、筋と腱から構成される筋腱複合体において、直列弾性要素の大部分は腱に存在するとされる (Alexander and Bennet-Clark, 1977)。

腱弾性を表す指標の一つにスティフネスがある。スティフネスは、女性よりも男性 (Onambele et al. 2007) が、一般人よりも長距離走者 (Kubo et al. 2000) が高値を示すように、個人差の存在が確認されている。スティフネスは、腱の太さ (腱断面積) や長さ (腱長) および材質 (ヤング率) といった物理因子によって規定され、スティフネスの個人差はこれら物理因子の個人差によるものと予想される。

横断的に腱の形態および力学的特性を調べた先行研究では、鍛錬者の腱断面積は非鍛錬者のそれよりも大きいものの、腱長やヤング率には差がないと報告されている (Rosager et al. 2002, Kongsgaard et al. 2005, Couppe et al. 2008)。このことと、筋腱複合体の生理学的背景を併せて考えると、鍛錬者が実施していたトレーニングによって腱に与えられたメカニカルな刺激が、物理因子のうちの腱断面積を増加させた可能性が考えられる。しかし、実際に短期的なトレーニングを実施させた場合、腱断面積が増加したという報告は1例 (Kongsgaard et al. 2007) に留まり、トレーニングの効果は明らかとなっていない。

そこで本論文は、上腕三頭筋腱のスティフネスを定量し、その個人差に関与する因子について検討すること、およびレジスタンストレーニングが上腕三頭筋腱に及ぼす影響について検討することを目的とした。

研究内容と主知見

第2章では、等尺性肘関節伸展筋力発揮中の上腕三頭筋外側頭筋腱移行部の移動距離を、超音波法を用いて計測し、上腕三頭筋外側頭筋が発揮した張力と腱伸長の関係から、上腕三頭筋腱のスティフネスを定量した。その結果、上腕三頭筋腱の力学的特性の測定は、反復測定間および測定日間において、いずれも高い再現性を有することが確認された。上腕三頭筋腱のスティフネス (83 N/mm) は、先行研究において報告されている下肢筋群の腱のスティフネスと比較

して、外側広筋腱 (63 N/mm, Kubo et al. 2006) より高値ではあるものの、腓腹筋腱 (87 N/mm, Magnusson et al. 2001) とほぼ同程度であった。このことは、上肢であるからといって、必ずしも腱のスティフネスが高いというわけではないことを示唆するものである。一方、本章の上腕三頭筋腱および先行研究における下肢筋群の腱のスティフネスは、個人差が大きく、変動係数にして25~52%のばらつきを示した。

第3章では、上腕三頭筋腱のスティフネスとそれを規定する物理因子である腱の長さ (腱長)、太さ (腱断面積)、材質 (ヤング率) との関係性を調べることで、スティフネスの個人差に関与する因子について検討した。スティフネスの測定は第2章と同様の方法を用いた。また、筋体積および腱断面積は、MRI法により取得した横断画像から計測した。その結果、スティフネスと腱断面積 ($r=0.52$, $p<0.05$) およびヤング率 ($r=0.59$, $p<0.01$) との間に有意な正の相関関係が認められたことから、スティフネスの個人差に関与する物理因子は、腱長ではなく、腱断面積とヤング率であることが示された。スティフネスの個人差に関与する因子のうち腱断面積は、筋体積 ($r=0.60$, $p<0.01$) および最大筋力 ($r=0.56$, $p<0.05$) と有意な正の相関関係を示した。このことは、トレーニングによる筋体積および筋力の増加は、腱断面積の増加を伴う可能性を示唆している。一方、ヤング率や腱長は、筋体積や最大筋力とは有意な相関関係を示さなかった。上腕三頭筋とその腱は直列に配置されているため、筋収縮に伴って、腱にはメカニカルなストレスが与えられる。こういった生理学的背景からみて、トレーニングによって増加する可能性を有しているのは、腱長やヤング率ではなく、腱断面積であると考えられる。

第4章では、12週間の肘関節伸展レジスタンストレーニングが上腕三頭筋腱に及ぼす影響について検討した。スティフネスの測定およびMRI法を用いた測定は、すべて第3章と同様の方法で行った。トレーニング群の被検者は週3回、12週間の肘関節伸展レジスタンストレーニングを実施した。姿勢は仰臥位で肩関節90deg (完全伸展位0deg) とし、保持したバーベルを2秒かけて肘関節完全伸展位まで伸展させ、2秒かけて屈曲させる動作を行った。1回の

トレーニングは、最大挙上重量 (1 repetition maximum; 1 RM) の80%を8回反復し、90秒の休憩を挟んで5セット繰り返すものとした。その結果、トレーニング後の上腕三頭筋筋体積は33%、肘関節伸展最大筋力は16%の有意な増加を示した。しかし、腱においては、張力の増加に伴って腱伸長が増加したものの、スティフネスは変化せず、それを規定する物理因子である腱断面積、腱長、ヤング率のいずれも変化しなかった。これまでに、レジスタンストレーニングが腱に及ぼす影響について検討した先行研究において、その多くが、筋体積や最大筋力の増加とともに、スティフネスが増加したことを報告している (Kubo et al. 2001, 2002, 2006a, 2006b, 2007, Reeves et al. 2003a, 2003b, Kongsgaard et al. 2007)。しかし、本研究において劇的な筋体積および最大筋力の増加が観察されたにもかかわらず、スティフネスは変化しなかったことから、先行研究において観察されたスティフネスの増加は、筋体積や最大筋力の増加に伴ったものではなかった可能性が考えられる。本研究において、スティフネスが変化しなかった要因としては、収縮様式 (トレーニング様式)、トレーニング期間、測定対象部位差の影響が考えられた。

総括論議

スティフネスは、腱の太さ (腱断面積)、長さ (腱長)、材質 (ヤング率) の3つの物理因子によって規定されていると考えられる。本論文第3章の結果、スティフネスの個人差に關与する物理因子は、腱長ではなく、腱断面積とヤング率であることが示された。そこで、さらにこれらの物理因子のうちで重み付けを試みるべく、スティフネスを従属変数に、3つの物理因子を説明変数にとって、強制投入法による重回帰分析を行い、各説明変数の寄与率を算出したところ、ヤング率が57%、腱断面積が33%、腱長が8%の順となった。つまり、スティフネスの個人差に最も關与する物理因子はヤング率であると考えられる。

スティフネスに対するヤング率の寄与率が最も高かったことについては、その要因として、ヤング率が変化しやすいパラメータであることが挙げられる。本研究において、3つの物理因子の個人差を表すCVは、腱断面積が16%、腱長が9%、ヤング率が26%であり、ヤング率が最も高値を示した。さらに、アキレス腱を対象とした先行研究 (Magnusson et al. 2003) や、膝蓋腱を対象とした先行研究 (de Boer et al. 2007) も同様に、ヤング率のCVが最も高値であり、反対に、腱断面積や腱長のCVは低値であった。つまり、ヤング率において個人差が大きいということは、それが変化しやすいパラメータであり、腱断面積や腱長は変化しにくいパラメータであることを示していると考えられる。

また、このことは、腱のスティフネスを規定する物理因

子の中でも、トレーニング期間 (時間) による適応に差があることを示している。動物においては、12週間のトレーニングでヤング率の増加が確認され (Buchanan et al. 2001)、12か月のトレーニングでは腱断面積の増加が認められている (Woo et al. 1980)。人間においても同様に、鍛錬者の腱断面積が非鍛錬者のそれよりも大きいという横断的な報告の存在は (Rosager et al. 2002, Kongsgaard et al. 2005, Couppe et al. 2008)、この知見を支持するものであるといえよう。したがって、トレーニングを開始すると、まず筋肥大や筋力の増加が起こり、腱の適応が開始されるとヤング率の変化が生じる。その後、トレーニングが長期に及ぶと、変化の対象はヤング率から腱断面積に移行すると考えられる。それらが、トレーニング開始から、いつ生じるかということについては、今後検討すべき課題である。

結論

本研究の結果、スティフネスは腱断面積およびヤング率との間で有意な正の相関関係を示した。このことから、スティフネスの個人差に關与する、スティフネスを規定する物理因子は、腱の太さ (腱断面積) と材質 (ヤング率) のであると考えられた。

本研究で実施した、肘関節伸展レジスタンストレーニングは、上腕三頭筋の肥大を生じさせ、肘関節伸展最大筋力および上腕三頭筋腱伸長を増加させた。しかし、先行研究で報告されているような、トレーニング後のスティフネスの増加はみられず、腱の太さ (腱断面積) や長さ (腱長) および材質 (ヤング率) にも変化はみられなかった。このことは、本研究における短期的なトレーニングは、劇的に筋を肥大させたものの、スティフネスおよびそれを規定する物理因子を変化させなかったことから、筋体積や最大筋力の増加の程度は、必ずしも腱形態や力学的特性の変化に關与しないことを意味している。

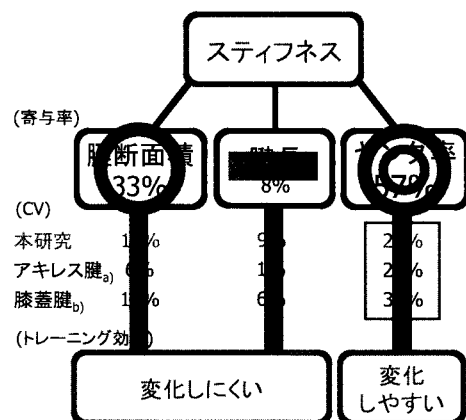


図 スティフネスの個人差に關与する因子とそのトレーニング効果
スティフネスの個人差は腱断面積およびヤング率と關与し、特にヤング率の關与が最も大きい。本研究の結果、短期的なトレーニングがそれらに影響を及ぼすことはなかった。しかし、本研究と先行研究を併せて考えると、ヤング率は個人差が大きいことから、変化しやすいパラメータであり、このことが高い寄与率に關与していると推察された。(a, Magnusson et al. Acta Physiol Scand. 2003, b, de Boer et al. J Physiol. 2007)